

# “Fabricação e caracterização de lasers de microdiscos em InGaAsP/InP ”

Aluno/RA: Elohim Fonseca dos Reis – 070715  
Orientador: Prof. Dr. Newton C. Frateschi  
Departamento de Física Aplicada – IFGW/UNICAMP



## Relatório Final de Iniciação Científica I – F 590

### Resumo:

Neste relatório serão apresentadas as atividades desenvolvidas nesta segunda parte do projeto e os resultados obtidos. A principal meta deste trabalho foi a fabricação e caracterização optoeletrônica de ressonadores de microdiscos processados em uma amostra epitaxial de alto ganho cuja região ativa é formada por poços quânticos de InGaAsP/InGaAsP confinados por barreiras de InP. Assim, mostraremos os processos de fabricação dos microdiscos e as posteriores medidas feitas. Além disso, apesar de não ter sido uma meta inicial do trabalho, investigamos o efeito da corrente de emissão do feixe de íons focalizado (FIB), que é utilizado para fazer a corrosão circular dos discos, na qualidade dos mesmos. Este tópico também será tratado neste relatório.

### Introdução:

Os ressonadores de microdiscos são extremamente vantajosos para a obtenção de emissão estimulada em volumes muito pequenos<sup>1</sup>; o raio dos microdiscos deste projeto é 8  $\mu\text{m}$ , sendo que já foram fabricados microdiscos muito menores, da ordem de 800 nm de raio. Com esses dispositivos é possível obter altos tempos de vida fotônico sem a necessidade de implementar complexos sistemas de realimentação óptica, como no caso dos lasers de cavidade vertical, pois utiliza-se *whispering gallery modes* (WGM)<sup>2</sup>. Os modos WGM são ressonâncias bastante confinadas com intensidade máxima perto da borda do disco<sup>3</sup>. Além disso, os microdiscos possuem uma estrutura planar e também uma emissão planar, o que permite uma fácil integração com outros dispositivos optoeletrônicos. Dessa forma, os ressonadores de microdiscos são dispositivos promissores para a obtenção de lasers de emissão planar fabricados com novos materiais amplificadores, como poços ou pontos quânticos, bem como para o desenvolvimento de elementos para processamento fotônico.

O bom funcionamento dos ressonadores de microdiscos está ligado intimamente a dois fatores principais: (1) baixa rugosidade da borda do disco para redução de perdas por espalhamento óptico e (2) redução da recombinação superficial para aumentar a eficiência quântica, isto é, eficiência de conversão de portadores em fótons<sup>4</sup>. O primeiro destes dois fatores é o motivo pelo qual estamos pesquisando a influência da corrente de emissão do FIB, pois é com o FIB que se faz a corrosão da amostra de forma a ter uma geometria circular, o que determina a rugosidade da borda do disco.

Assim, o objetivo principal deste projeto é o estudo da fabricação de ressonadores de microdiscos e sua caracterização optoeletrônica. Para isso, o projeto foi dividido em três partes.

Na primeira parte, foi feito um estudo teórico voltado para a compreensão dos lasers de semicondutores. Assim, foram estudados alguns tópicos gerais dos materiais semicondutores como crescimento de cristais, redes cristalinas, bandas de energia; guias de onda e cavidades ressonantes. Esse estudo foi levado adiante paralelo ao andamento do projeto, estudando lasers de semicondutores e ressonadores de microdiscos.

Na segunda parte do projeto foi estudada a fabricação de um laser de face clivada e sua caracterização optoeletrônica. A fabricação, onde utilizamos *wafers* com estruturas de seis poços quânticos tensionados de InGaAsP/InGaAsP com camadas confinantes de InP<sup>5</sup>, se mostrou ser um processo extremamente delicado e com várias etapas (que foram descritas detalhadamente no relatório parcial). Uma das principais dificuldades na fabricação foi a manipulação da amostra, pois ela é extremamente quebradiça e fica ainda mais delicada após ser desbastada para ser clivada e depois medida.

Apesar disso, as medidas obtidas para o laser de face clivada, apresentadas no relatório parcial, foram bastante satisfatórias. A curva IxV, corrente em função da tensão, ficou excelente, o que mostra a boa qualidade do diodo e das etapa de processamento. A resistência em série do laser foi de  $R_s = 8,47\Omega$  e a resistência em paralelo foi de  $R_p = 100M\Omega$ , o que mostra o bom funcionamento do diodo. A curva de potência emitida em função da corrente teve a forma característica de um laser semiconductor<sup>6</sup>. Além disso, uma comparação dos espectros obtidos para diferentes correntes com o gráfico de potência emitida em função da corrente injetada, se nota uma total coerência entre eles com respeito à corrente limiar, que era em torno de 33 mA, a partir da qual havia emissão espontânea.

Na terceira e última parte, que será apresentada neste relatório, foi estudada a fabricação e caracterização optoeletrônica de ressonadores de microdiscos. Como também fizemos uma investigação da influência da corrente de emissão do FIB na qualidade do dispositivo, fabricamos três discos de 8  $\mu\text{m}$  de raio, cada um com uma corrente de emissão diferente: 7 nA, 0,5 nA e 0,1 nA. A fabricação consiste na limpeza da amostra, metalização, tratamento térmico, corrosão com o FIB para obter a geometria circular, corrosão úmida seletivo e nova limpeza. Na caracterização foram feitas medidas de curva IxV, calculou-se as curvas da resistência dinâmica pela tensão e medimos espectros para diferentes correntes de injeção.

Quanto aos estudos da influência da corrente de emissão do FIB na qualidade dos microdiscos, podemos ver que entre as três correntes, a que apresentou o dispositivo de melhor desempenho, ao contrário do esperado, foi a corrente de 0,5 nA. Esperávamos que o melhor resultado fosse obtido para a corrente de 0,1 nA, pois é a que faz a corrosão de forma menos agressiva, realizando um melhor polimento da borda do disco. Todavia devemos levar em conta o efeito da deposição de gálio pelo FIB, que altera as propriedades do dispositivo. No entanto, isso é apenas um indício, pois é necessário realizarmos mais medidas para chegar a uma conclusão mais forte.

Vale ressaltar que as etapas realizadas no FIB, apesar de terem sido acompanhadas pelo aluno, foram realizadas pelo aluno de mestrado Luis A. M. Barea. A etapa de metalização, também tendo sido acompanhada pelo aluno, foi realizada

pelo físico Antônio A. G. Von Zuben. Todo o trabalho de fabricação e de caracterização dos dispositivos foi realizado no Laboratório de Pesquisa de Dispositivos (LPD) no Departamento de Física Aplicada – IFGW/UNICAMP e no Centro de Componentes e Semicondutores (CCS) – FEEC/UNICAMP.

### **Descrição das atividades desenvolvidas:**

Nesta segunda parte do projeto, utilizando os conceitos aprendidos na primeira parte com o laser de face clivada, foi realizada a fabricação de ressonadores de microdiscos e sua posterior caracterização optoeletrônica.

#### **-Fabricação dos ressonadores de microdiscos:**

Como já foi mencionado, a estrutura epitaxial da amostra utilizada é constituída de seis poços quânticos (6-QW) tensionados de InGaAsP/InGaAsP com camadas confinantes de InP, como é mostrado na figura 1.



**Figura 1:** Estrutura epitaxial da amostra utilizada.

A fabricação dos microdiscos é dividida em seis etapas: limpeza da amostra, metalização para formação do contato ôhmico p, metalização para formação do contato ôhmico n, tratamento térmico, corrosão com o FIB, corrosão úmida seletiva, limpeza.

**a) Limpeza da amostra:** Nesta etapa a amostra se encontra como na figura 1. Para limpá-la, primeiro passa-se um jato de nitrogênio e depois ela é banhada em tricloroetileno (10min), acetona (10min) e isopropanol (5min) nesta ordem, todos em fervura. Sendo sempre seca com o jato de nitrogênio.

**b) Metalização I:** Metalização de Ti/Pt/Au (300/1000/2000 Å) para formação do contato ôhmico p sobre a camada de InGaAs-p, em um sistema de evaporação por feixe de elétrons modelo ULS400 da Balzers.

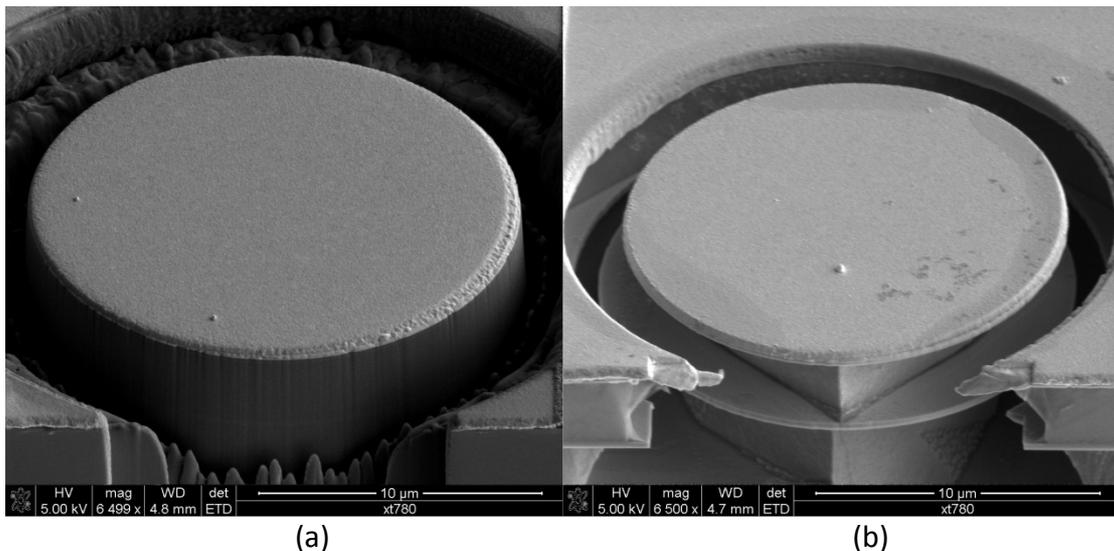
**c) Metalização II:** Metalização de Ni/Ge/Au/Ni/Au (50/300/1000/500/1000 Å) na parte do substrato (não polido) para formação do contato ôhmico n, onde é utilizado o mesmo sistema da metalização I.

**d) Tratamento térmico:** Para formação do contato elétrico da metalização é feito um tratamento térmico a 420°C por 30s em forno RTP (*Rapid Thermal Annealing*).

**e) Corrosão com o FIB:** A etapa de corrosão com o FIB é a etapa na qual a geometria circular dos discos é feita. Essa corrosão é feita com o feixe de íons de gálio na

superfície onde se encontra o contato p. A intensidade do feixe é determinada pela corrente de emissão, já que utilizamos sempre a mesma diferença de potencial de 30 kV. Neste trabalho, foram fabricados três discos com 8  $\mu\text{m}$  de raio com três correntes de emissão de íons diferentes no FIB e respectivo tempo de duração: 7 nA (50s), 0,5 nA (697s) e 0,1 nA (1560s). No fim desta etapa, a amostra se encontra como mostrado na figura 2(a).

**f) Corrosão química úmida seletiva:** A corrosão química é feita utilizando-se uma solução de 3 HCl : 1  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , que não corrói nenhuma liga que contenha arsênio. Portanto, são corroídas apenas as camadas de InP, como pode ser visto na figura 2(b). Devido à estrutura cristalina do InP, a região corroída deixa um pedestal com base rômbrica. O tempo de corrosão total foi 55s. Note que agora a região ativa fica exposta.

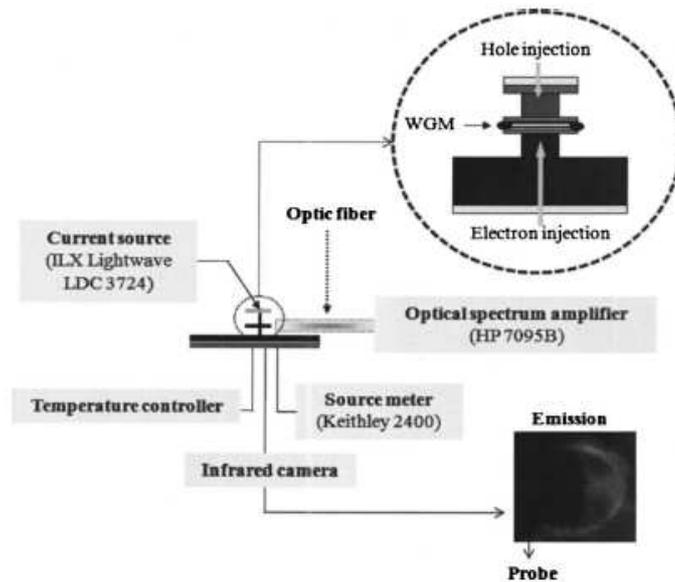


**Figura 2:** Fotos feitas com o feixe de elétrons do FIB: (a) amostra corroída pelo FIB, (b) amostra após o processo de etching.

**g) Limpeza:** Após o processo de corrosão química seletiva, a amostra é limpa novamente com acetona e isopropanol, e passa-se um jato de nitrogênio.

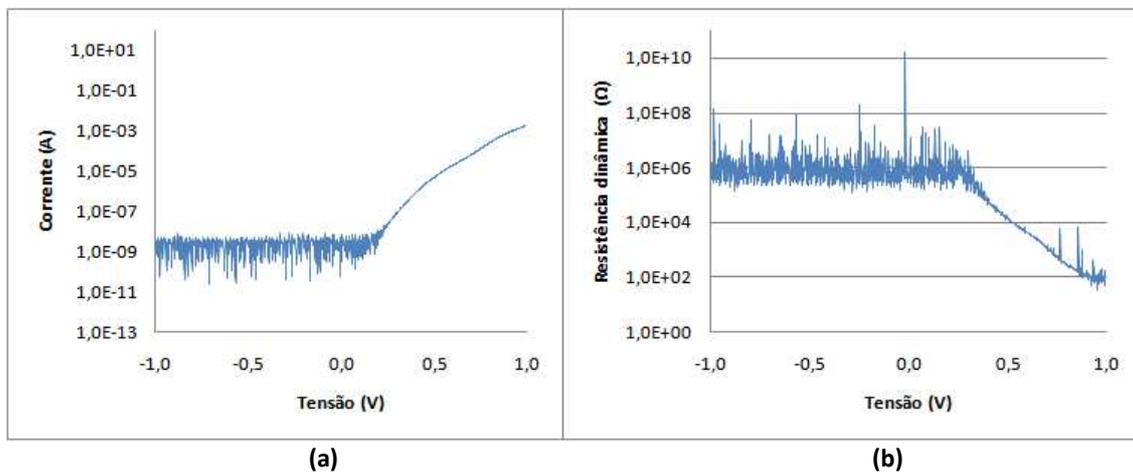
#### **-Caracterização optoeletrônica dos ressonadores de microdiscos:**

Na caracterização dos ressonadores de microdiscos foram feitas as medidas de corrente de injeção em função do potencial aplicado e mediu-se o espectro do dispositivo para diferentes correntes de injeção. O arranjo experimental utilizado é mostrado na figura 3. A amostra foi colocada em uma plataforma onde a temperatura era controlada por um módulo Peltier. Todas as medidas foram realizadas a uma temperatura de 18°C. Uma ponta de prova, que é o ânodo, era colocada no disco e o fundo do substrato, o cátodo comum a todos os discos, era conectado ao neutro.



**Figura 3:** Esquema do aparato experimental usado para a caracterização do disco. A imagem mostra a emissão do disco, feita com uma câmera infravermelha.

Para medir as curvas  $I \times V$ , corrente em função da tensão, foi utilizado um Keithley 2400, que foi utilizado como fonte de tensão e medidor de corrente. Este enviava os pontos  $(I, V)$ , através de uma porta GPIB, para um PC onde havia um programa da plataforma LabView com o qual era possível salvar os dados. A curva obtida para um disco de  $8 \mu\text{m}$  de raio processado com uma corrente de emissão de  $0,1 \text{ nA}$  no FIB é mostrada na figura 4.

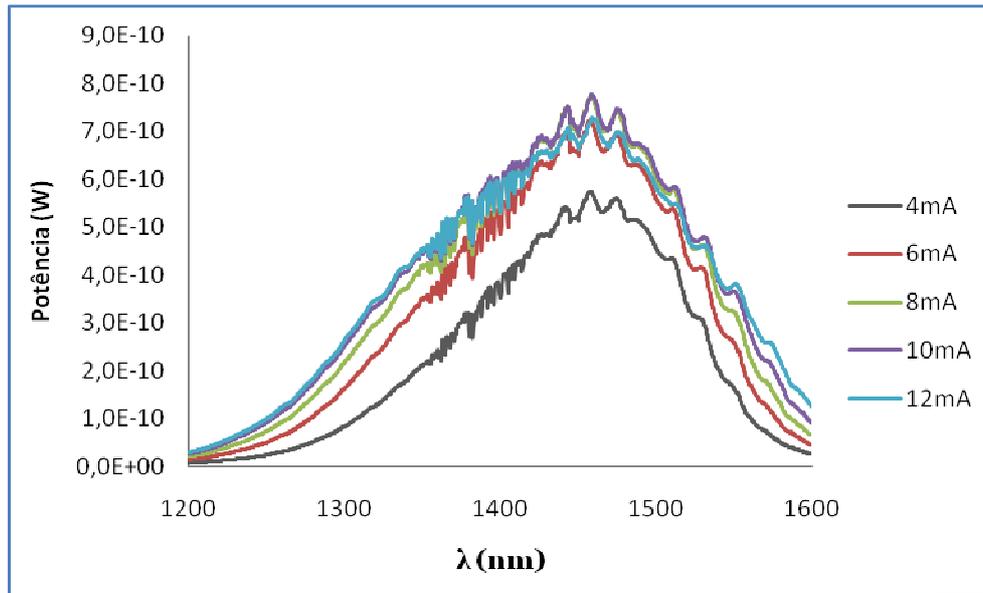


**Figura 4:** (a) Curva  $I \times V$  em escala mono-log de um ressonador de microdisco de  $8 \mu\text{m}$  de raio processado no FIB com uma corrente de emissão de  $0,1 \text{ nA}$ . (b) Curva da resistência dinâmica do microdisco.

Observando a figura 4(a), vemos que na curva de corrente em função da tensão há grande ruído quando aplicada a tensão de polarização reversa. Isto ocorre, provavelmente por estarmos trabalhando na região de ruído de nosso equipamento, além de um possível problema no contato do dispositivo. Apesar disso, a curva apresenta um comportamento típico de um diodo. A figura 4(b) apresenta a curva da resistência dinâmica do microdisco em função da tensão. A resistência em paralelo do laser foi de, aproximadamente,  $1 \text{ M}\Omega$ . Esse valor é bom, considerando que a resistência

em paralelo deve ser bastante alta. Já a resistência em série foi da ordem de 100  $\Omega$ . Este valor é razoável, pois se espera que seja bem pequeno para não haja aquecimento por efeito Joule.

Para medir o espectro de emissão do microdisco, utilizava-se uma fonte de corrente ILX Lightwave LDC-3724. A emissão era captada por uma fibra óptica posicionada perpendicularmente à região ativa do disco. A luz captada pela fibra era levada ao amplificador de espectro óptico (OSA), modelo HP70950B. Os espectros foram obtidos com uma média de dez varreduras e a resolução de banda foi de 1nm.

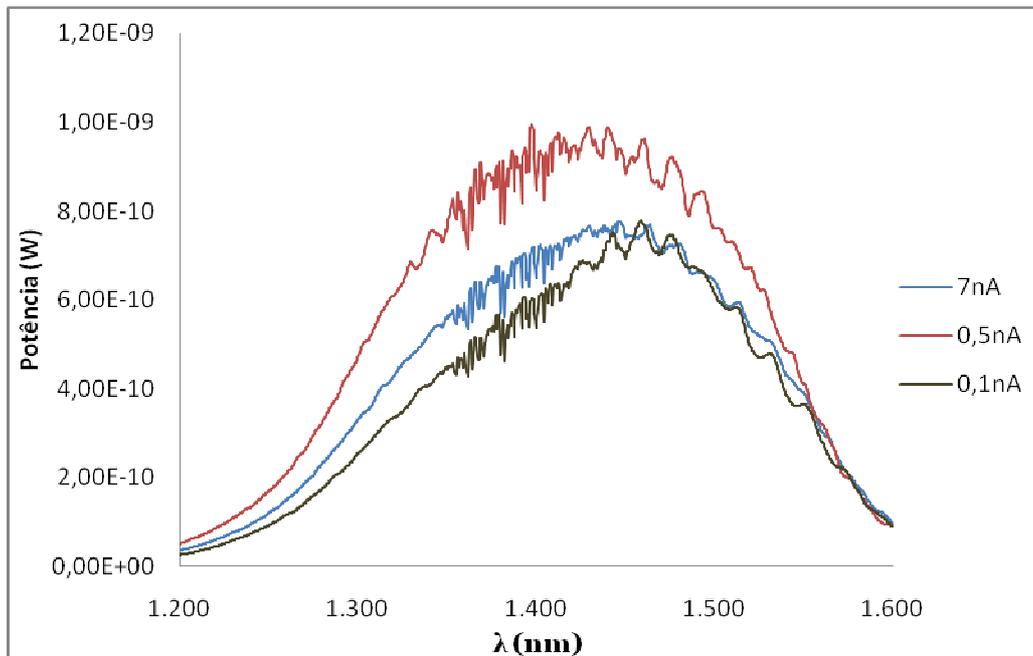


**Figura 5:** Espectros das emissões de um microdisco de 8  $\mu\text{m}$  de raio pela aplicação de corrente contínua, variando de 4 a 12 mA. Medidas feitas com uma resolução de banda de 1nm e com uma média de dez varreduras.

A figura 5 mostra os espectros de emissão do microdisco de 8  $\mu\text{m}$  de raio obtidos para algumas correntes de injeção contínua, variando de 4 a 12 mA. O espaçamento médio entre os modos observados é de  $\Delta\lambda = 16\text{nm}$ . Este valor está de acordo com o valor calculado para o *free spectral range* (FSR)  $\Delta\lambda = \lambda^2 / 2\pi R n_{\text{ef}} = 15,7\text{ nm}$  para *whispering-gallery modes*<sup>4</sup>, onde  $\lambda$  é o valor do comprimento de onda do pico de maior intensidade,  $R$  é o raio do disco e  $n_{\text{ef}}$  é o índice de refração efetivo do meio, que vale 2,7. Levando-se em conta que a borda do disco não se encontra muito afastada do pedestal, apenas modos radiais de primeira ordem ( $N=1$ ) são observados, isto é, modos WGM<sup>7,8</sup>. Assim, o modo de maior intensidade é o modo  $M = 2\pi R n_{\text{eff}} / \lambda = 93$  visto na figura 5. Esse modo corresponde à solução radial da função de Bessel de ordem  $M$ , que corresponde ao confinamento azimutal dos modos eletromagnéticos na cavidade ressonante. Este resultado é obtido ao se resolver a equação de Helmholtz, que é separável em  $r$  e  $\theta$  para o campo eletromagnético no interior do disco,  $\psi(r,\theta)_{\text{int}} = R(r)e^{iM\theta}$ . A solução desta equação, ao se impor a condição de contorno  $\psi(R,\theta)_{\text{int}} = 0$ , onde é feita a aproximação dos modos do microdisco pelo modos de uma *whispering gallery mode* ( $N=1$ ), é dada por  $\psi(r,\theta)_{\text{int}} = A_M J_M(r n_{\text{eff}} \omega_{M,N} / c) e^{iM\theta}$ , onde  $J_M$  são as funções de Bessel de ordem inteira  $M = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$  e  $A_M$  é uma constante de normalização. Além disso, nota-se que há um comportamento estranho no lado esquerdo dos

espectros, onde não podemos ver com clareza os modos. Isto se dá, provavelmente, devido à absorção de água pela amostra.

**-Comparação do desempenho dos ressonadores de microdiscos em relação à corrente de emissão do FIB:**



**Figura 6:** Espectros das emissões de microdiscos de 8 μm sob corrente de injeção de 10 mA, fabricados com FIB com diferentes correntes de emissão do feixe de íons (7 nA, 0,5 nA e 0,1 nA).

A figura 6 mostra o espectro de três discos de 8 μm de raio fabricados com FIB, mas cada um com uma corrente de emissão de íons diferente, sendo as três: 7 nA, 0,5 nA e 0,1 nA. Esses três espectros foram medidos com uma corrente de injeção de 10 mA, resolução de banda de 1nm e sendo feita uma média de dez varreduras com o OSA.

Analisando a fig. 6, pode-se notar que o espectro que tem a maior intensidade de emissão é aquele referente ao disco fabricado com uma corrente de emissão de 0,5 nA. Esperava-se que o microdisco com melhor desempenho fosse aquele fabricado com a corrente de emissão de 0,1 nA. Isso porque uma corrente de emissão menor faria um melhor polimento das bordas do disco, o que diminui as perdas por espalhamento óptico e a recombinação superficial, melhorando a qualidade de funcionamento do microdisco. No entanto, é necessário levar em conta o fato de que a corrosão com o FIB deposita gálio na amostra e há indícios de que os íons  $\text{Ga}^+$  causam danos ao dispositivo. Além disso, a potência do feixe é proporcional à corrente de emissão, dada por  $P = IV$ , onde  $I$  é a corrente de emissão e  $V$  é a diferença de potencial com que os íons são acelerados. Isso porque o número de íons total incididos na amostra é dado por  $\Phi = It/e$ , onde  $t$  é o tempo de corrosão; a energia total incidida na amostra é dada por  $E_T = \Phi \langle E \rangle$ , onde  $\langle E \rangle$  é a energia média de cada íon, que é dada por  $\langle E \rangle = eV$ , sendo “e” a carga elementar. A potência, então, é dada por  $P = E_T/t = IV$ . Comparando os espectros das correntes de emissão de 7 nA e de 0,5 nA, vemos uma qualidade melhor no microdisco feito com 0,5 nA. Isso está de acordo com a análise

feita, pois o potência do feixe de íons para 7 nA é maior que para o 0,5 nA e o tempo que esta energia com a corrente de 7 nA é dissipada na amostra (50s) é menor que o tempo com a corrente de 0,5 nA (697s). Assim, a corrente de emissão de 7 nA aquece a amostra mais que a corrente de 0,5 nA, o que deve estar danificando a amostra, além do fato de deixar a borda do disco mais rugosa. Já no caso da corrente de emissão de 0,1 nA está ocorrendo algum fenômeno que ainda deve ser explicado ou pode haver algum problema neste dispositivo. Para melhorar os danos causados pela deposição de gálio, há a proposta de se fazer um tratamento térmico após a corrosão com o FIB, que tem mostrado bons resultados<sup>9</sup>. Todavia, foi feito apenas um disco para cada corrente de emissão e foram testadas apenas três correntes de emissão. Assim, há a possibilidade de haver vários erros embutidos nesta primeira análise, como defeito da amostra no local onde foi fabricado o dispositivo ou mesmo defeito do próprio dispositivo. Portanto, ainda não é possível chegar a conclusões fortemente embasadas. Esta investigação teve início há pouco tempo e ainda está em andamento.

### **Conclusão:**

Neste projeto foi feito inicialmente um estudo sobre propriedades dos materiais semicondutores e alguns fenômenos físicos relacionados com o funcionamento dos lasers de semicondutores. Concomitantemente aos processos de fabricação e caracterização, foram feitos estudos sobre lasers de semicondutores e ressonadores de microdiscos.

Na segunda etapa, foram fabricados lasers de face clivada. A fabricação destes lasers se mostrou ser bastante delicada, com várias etapas, que envolviam corrosão química, utilização de plasma para deposição de certos materiais e para limpeza, litografia óptica, onde se fez uso de máscaras especiais, tratamento térmico, metalização, clivagem, etc. A caracterização dos lasers de face clivada através da curva de corrente em função da tensão, dos espectros de emissão e da curva de potência emitida em função da corrente, mostrou o bom funcionamento e conseqüentemente o sucesso da fabricação destes dispositivos.

Os conhecimentos adquiridos com os lasers de face clivada foram aplicados na terceira parte do projeto. Nesta última fase foram fabricados e caracterizados ressonadores de microdiscos. A fabricação destes dispositivos se mostrou ser mais simples que a dos lasers de face clivada por usar o sistema de feixe de íons focalizados (FIB). A caracterização através dos espectros de emissão e da curva IxV mostrou que apesar dos resultados não serem os ideais, foi possível detectar a presença de modos WGM nos microdiscos.

Por fim, foi iniciada uma pesquisa da qualidade final dos microdiscos com relação à influência da corrente de emissão de íons do FIB no processo de fabricação. Isso está sendo investigado, pois a rugosidade da borda dos discos está ligada à intensidade da corrente de emissão do FIB. No entanto, ainda há poucas medidas para se chegar a uma conclusão concreta.

## Referências:

---

- <sup>1</sup> S. L McCall, A. F. J. Levi, R. E. Slusher, S. J. Pearton, and R. A. Logan, Appl. Phys. Lett. (60) 289 (1992).
- <sup>2</sup> N. C. Frateschi, A. F. J. Levi, The Spectrum of Microdisk Lasers, J. Appl. Phys, Vol. 80, N°2, July 1996.
- <sup>3</sup> Lord Raleigh, Scientific Papers 5, 617 (1912).
- <sup>4</sup> L. A. M. Barea, F. Vallini, A. R. Vaz, J. R. Mialichi and N. C. Frateschi, Low-roughness active microdisk resonators fabricated by focused ion beam, J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 27, N° 6, Nov/Dec 2009.
- <sup>5</sup> U. Koren, B. I. Miller, Y. K. Su, T. L. Koch, and J. E. Bowers, "Low-internal-loss separate confinement heterostructure InGaAs/InGaAsP quantum well laser", Appl. Phys. Lett., Vol. 51, pp.: 1744, 1987.
- <sup>6</sup> G.P. Agrawal and N.K. Dutta, "Semiconductor Lasers", Second Edition, Van Nostrand Reinhold, New York (1993) páginas 1-5, 11-12, 34-35, 39-55, 65-67, 133, 348, 459-460.
- <sup>7</sup> U. Mohideen, R. E. Slusher, F. Jahnke, and S. W. Koch, Phys. Rev. Lett. 73, 1785 (1994).
- <sup>8</sup> A. C. Tamboli, E. D. Harberer, R. Sharma, K. H. Lee, S. Nakamura, and E. L. Hu, Nat. Photonics 1, 61 (2007).
- <sup>9</sup> F. Vallini, D. S. L. Figueira, P. F. Jarschel, L. A. M. Barea, A. A. G. von Zuben, A. S. Filho, and N. C. Frateschi, J. Vac. Sci. Technol. B 27, L25 (2009).

## Agradecimentos:

O aluno gostaria de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), ao Centro de Pesquisa em Óptica e Fotônica (CEPOF), e aos Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia (INCT) para Comunicações Ópticas (FOTONICOM) pelo apoio financeiro para a realização do projeto e ao CNPQ também pela bolsa de iniciação científica. O aluno também gostaria de agradecer ao orientador prof. Dr. Newton Frateschi pela paciência e disponibilidade para ensinar física, por estar ensinando como pesquisar e como ser um pesquisador, agradecer ao aluno de doutorado Felipe Vallini e ao aluno de mestrado Luis Barea por estarem prestando uma grande ajuda e por estarem me ensinando no laboratório.

## Comentários do orientador:

### -Relatório parcial:

O aluno está tendo um progresso notável. Neste primeiro relatório ele mostra que participou da fabricação e caracterização de lasers convencionais de semicondutor. Esta primeira etapa é fundamental para que ele inicie sua dedicação a lasers de micro-disco.

Considero o trabalho até aqui muito bom.

---

O aluno completou o trabalho com a fabricação de microressonadores por FIB. Ele inclusive iniciou um estudo de otimização do processo para minimizar os danos. O relatório está bem escrito e o trabalho como todo muito bom.

Newton